

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ПЕТРЕНКО ОЛЕКСІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 531.383

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ
ВІБРАЦІЙНОГО ГІРОСКОПА З МЕТАЛЕВИМ ЦИЛІНДРИЧНИМ
РЕЗОНАТОРОМ**

Спеціальність 05.11.03 – гіроскопи та навігаційні системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеню
кандидата технічних наук

Київ-2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі аерокосмічних систем управління Національного авіаційного університету Міністерства освіти і науки України та у Публічному акціонерному товаристві «Науково-виробниче об'єднання «Київський завод автоматики»

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент
ЧІКОВАНІ Валерій Валеріанович,
Національний авіаційний університет,
професор кафедри аерокосмічних систем управління.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук
ЧЕРНЯК Сергій Іванович,
Приватне акціонерне товариство «РАМЗАЙ»,
головний конструктор

кандидат технічних наук
ГОЛОВАЧ Сергій Володимирович,
Акціонерне товариство «ЕЛМІЗ»,
головний фахівець напрямку гіроскопи та навігаційні системи

Захист відбудеться «27» листопада 2020 р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.07 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою 03056, м.Київ, проспект Перемоги, 37, ауд. 317.

З дисертацією можна ознайомитись у Науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою 03056, м.Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий « 20 » жовтня 2020 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



Ю.В.Киричук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. За хронологією, вібраційні гіроскопи – останні гіроскопічні технології, наявні в даний час на світовому ринку. Всі технологічно розвинені країни активно працюють над удосконаленням цієї технології з метою збільшення точності вимірювання кутової швидкості, зменшення габаритів і вартості кінцевої продукції. У цьому плані, вібраційні гіроскопи з металевим резонатором забезпечують достатньо високу точність, можуть застосовуватись для військових потреб, таких як системи стабілізації, наведення, орієнтації і управління польотом, та цивільних, таких як вимір положень залізничних колій та нафтопроводів, стабілізації кіно- і телеапаратури, безпілотних автомобілів та літаках, підводних пошукових апаратах та ін. Крім того, Коріолісовий вібраційний гіроскоп (КВГ) з металевим резонатором може працювати у трьох режимах роботи: режимі вимірювання кутової швидкості, інтегруючому та диференційному режимах, з автоматичним переключенням з режиму на режим, що розширює його можливості з використання у змінних умовах навколишнього середовища. Застосування гіроскопів на різноманітних об'єктах вимагає від них багато у чому суперечливі вимоги. До них відносяться: стійкість до вібрацій, низька чутливість до лінійного прискорення, стійкість до ударів і, в той же час, невеликий шум при вимірюванні малих кутових швидкостей, великий діапазон вимірювання кутових швидкостей.

Тому актуальність роботи полягає у тому, що досліджується перший головний режим вимірювання кутової швидкості багаторежимного вібраційного гіроскопу, який має переваги перед двома іншими режимами в частині більш високої точності при вимірюванні малих кутових швидкостей, має достатньо великий діапазон вимірювання, смугу пропускання та стійкість до вібро-ударних збурень, що задовольняє більшість потреб і, в той же час, має низьку вартість.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційну роботу виконано на кафедрі аерокосмічних систем управління Національного авіаційного університету в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи за темою: №244-ДБ19 «Методологія проектування високоточних стабілізованих платформ для комплексів спеціальної апаратури літальних апаратів з використанням перспективних інерціальних технологій» (номер держреєстрації 0119U100654); держбюджетної кафедральної науково-дослідної роботи №95/22.01.08 «Розробка та впровадження методології дослідницького підходу при викладанні курсів, за профілем кафедри»; держбюджетної кафедральної науково-дослідної роботи №15/22.01.08 «Розробка методології проектування робастних систем стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв визначення орієнтації рухомих об'єктів», кафедральна держбюджетна НДР № 37/22.01.08 «Вплив зовнішніх та внутрішніх факторів на роботу вібраційного гіроскопа», а також відповідно до госпрозрахункової

науково-дослідної роботи №796-X13 «Розробка методик корекції та паспортизації параметрів Коріолісового вібраційного гіроскопа та дослідження режимів його роботи» та згідно планів науково-технічної ради Публічного акціонерного товариства «Науково-виробниче об'єднання «Київський завод автоматики».

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є наукове обґрунтування конструкції чутливого елементу вібраційного гіроскопа, що працює в режимі вимірювання кутової швидкості і забезпечує високу чутливість при вимірюванні малих кутових швидкостей, широкий діапазон вимірювання та достатньо високу стійкість до вібро-ударних прискорень, забезпечити корекцію зміщення нуля, масштабного коефіцієнту та мінімізувати вплив сигналу квадратури на сигнал кутової швидкості при зміні температури.

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно вирішити такі задачі:

1. Провести аналіз властивостей чутливого елементу вібраційного гіроскопа з резонатором, виготовленим із елінварного сплаву.
2. Розробити методику температурної корекції фаз сигналів кутової швидкості та квадратури, що забезпечують мінімізацію впливу одного сигналу на інший.
3. Розробити метод багатопараметричної корекції масштабного коефіцієнту, що має перевагу над існуючим способом по точності.
4. Реалізувати багатопараметричну корекцію зміщення нуля, що має перевагу над існуючим способом по точності.
5. Виготовити експериментальний зразок КВГ з металевим циліндричним резонатором і провести експериментальні дослідження на вібро-ударостійкість і точність при постійній та змінній температурі.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання кутової швидкості за допомогою КВГ, що працює у режимі датчика кутової швидкості в умовах його експлуатації.

Предметом дослідження є методи підвищення точності вібраційного гіроскопа з металевим циліндричним резонатором, аналізу властивостей чутливого елементу та корекції похибок, що пов'язані зі змінами навколишнього середовища.

Методи дослідження. Розробка конструкції резонатору та його аналіз виконується за допомогою комп'ютеризованих засобів конструювання та аналізу властивостей конструкції. Для оцінки кутової швидкості за результатами вимірювань використано стохастичні методи математичної статистики та теорії оцінювання. При розрахунку похибок використовувалися варіаційні та диференційні рівняння. Формування моделі і моделювання режимів роботи КВГ виконувалося у системі Matlab-Simulink; налаштування параметрів моделі виконувалося на основі критеріїв, розроблених у теорії автоматичного керування; обробка даних вимірювань при експериментальних дослідженнях виконано в системі Matlab.

Наукова новизна одержаних результатів

У роботі отримані такі нові наукові результати:

1. Вперше розроблено та реалізовано багатопараметричний метод корекції масштабного коефіцієнту КВГ, який може бути використаний при роботі КВГ як у режимі датчика кутової швидкості (КВГ–ДКШ), так і в диференційному режимі (КВГ–ДКШ–Д). На цей спосіб отримано патент.

2. Вперше проведено науково обґрунтований аналіз нової конструкції циліндричного резонатора із отворами на твірній поверхні циліндру, що має більш високу вібро-ударостійкість.

3. Розроблено та реалізовано метод багатопараметричної корекції дрейфу нуля, що має переваги над існуючими по точності корекції.

4. Вперше проведено експериментальні дослідження на виготовленому експериментальному зразку КВГ з розробленим металевим циліндричним резонатором із елінварного сплаву, які показали високу точність корекції масштабного коефіцієнту та дрейфу нуля при дії температурного градієнту, а також високу вібро-ударостійкість виготовленого зразка.

Практичне значення одержаних результатів:

- проведено порівняння двох конструкцій металевих циліндричних резонаторів з отворами на дні та на твірній поверхні циліндру. Шляхом розрахунків і комп'ютерного моделювання обґрунтовані переваги другого варіанту конструкції над першим у частині вібро-ударостійкості;

- виконано комп'ютерний аналіз та виявлено вплив різної геометрії отворів у резонаторі на його резонансні частоти. Вироблено рекомендації щодо проектування резонаторів та його елементів;

- сформульовано вимоги до конструкції основи, на яку встановлюється новий розроблений резонатор з отворами на твірній поверхні циліндру;

- експериментально обґрунтовано вибір п'єзoeлектродів, що використовуються для збудження коливань і вимірювання сигналів металевого резонатору;

- розроблено методики та створено обладнання для безелектродного вимірювання динамічних параметрів металевого резонатора після його виготовлення та балансування мас резонатора по четвертій гармоніці дебалансу для зменшення його різночастотності. Методики апробовані при виготовленні експериментального зразка КВГ;

- удосконалено блок-схему алгоритму керування стоячою хвилею КВГ, що забезпечує швидкий старт гіроскопа при його включенні на будь-якій температурі з діапазону робочих температур;

- розроблено та відпрацьовано на експериментальному зразку КВГ методики температурної корекції фаз сигналів квадратури та кутової швидкості, багатопараметричної корекції дрейфу нуля і масштабного коефіцієнту, що призводить до збільшення точності виміру кутової швидкості в умовах дії температурних градієнтів;

Впровадження результатів роботи. Результати дисертаційної роботи впроваджено у навчальному процесі на кафедрі «Аерокосмічні системи управління» Національного авіаційного університету в навчальній дисципліні «Основи технологій виготовлення пристроїв БСУ» та в процесі дипломного та курсового проектування зі спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», а також – у дослідженнях за тематикою Публічного акціонерного товариства «Науково-виробниче об'єднання «Київський завод автоматики».

Особистий внесок здобувача. Особисто автором виконано аналіз літературних даних за темою досліджень, плануванні та проведенні експериментів, обробці експериментальних даних та апробації отриманих наукових результатів на наукових конференціях. Автором було вперше розроблено та відпрацьовано на експериментальному зразку КВГ багатопараметричний спосіб корекції масштабного коефіцієнту КВГ. На цей спосіб отримано патент. Було розроблено та проведено науково-обґрунтований аналіз нової конструкції циліндричного резонатора з отворами на твірній поверхні циліндру, що має більш високу віброударостійкість. Проведено експериментальні дослідження на виготовленому експериментальному зразку КВГ. Розроблено та відпрацьовано на експериментальному зразку КВГ методики температурної корекції фаз сигналів квадратури та кутової швидкості, багатопараметричної корекції дрейфу нуля. Розроблено методику та обладнання робочого місця балансування мас резонатора по 4-ій гармоніці дебалансу. Виконано аналітичні розрахунки впливу похибок виготовлення чутливого елементу на зміщення нуля і масштабний коефіцієнт.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались та одержали позитивну оцінку на наступних науково-технічних конференціях, семінарах, конгресах: III міжнародна конференція «Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)» (м.Київ, 14-17 жовтня 2014 р.); VI світовий конгрес «Aviation in the XXI-st century «Safety in aviation and space technologies» (м.Київ 23-25 вересня 2014 р.); VIII міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2015)» (м.Київ, 18-19 травня 2015 р.); XII Міжнародна науково-технічна конференція «Авіа-2015» (м.Київ, 28-29 квітня 2015 р.); VII світовий конгрес «Aviation in the XXI-st century «Safety in aviation and space technologies» (м.Київ, 19-21 вересня 2016 р.); XI Міжнародна науково-технічна конференція «Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки» (м.Київ, 13-14 квітня 2017 р.); XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Авіа-2017» (м.Київ, 19-21 квітня 2017 р.); Науково-технічна конференція «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM» (м.Київ, 21-23 листопада 2018р.); XII міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні

робототехнічні комплекси» (ІРТК-2019) (м.Київ, 21-22 травня 2019 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Die Relevanz und die Neuheit der modernen wissenschaftlichen Studien» (м.Відень, Австрія, 23 серпня 2019 р.); Науково-практична конференція «Сучасні світові тенденції розвитку науки, технологій та інновацій» (м.Ужгород, 28-29 червня 2019 р.); I міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні моделюючі технології, системи та комплекси (ІМТСК-2019)» (м.Черкаси, 29-31 травня 2019 р.); Міжнародна наукова інтернет-конференція «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (м.Тернопіль, 9 липня 2019 р.); VII науково-технічна конференція «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики і України. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки» (м.Київ, 9-10 жовтня 2019р.); 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD-2019) (м.Київ, 22-24 жовтня 2019р.).

Також результати досліджень доповідались та обговорювались на наукових семінарах кафедри аерокосмічних систем управління Національного авіаційного університету.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 29 наукових праць, у тому числі 8 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у виданнях іноземних держав, 5 – у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 1 патент на винахід, 2 патенти на корисну модель, 14 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій та 4 публікації в інших виданнях.

Структура та обсяг дисертаційної роботи

Дисертаційна робота складається із переліку умовних позначень і скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Роботу викладено на 166 сторінках основного друкованого тексту. Повний обсяг дисертаційної роботи 218 сторінок друкованого тексту, містить 93 рисунки, 19 таблиць, 6 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність досліджень, можливості підвищення точності КВГ, сформульовано мету і завдання, наукову новизну, практичне значення отриманих результатів. Наведено основні наукові та практичні результати, які отримано у дисертаційній роботі. Визначено структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У **першому розділі** проаналізовано конструкцію основних частин КВГ з металевим резонатором, визначено принципи їх побудови для проведення моделювання. Проведено вибір матеріалу для виготовлення резонаторів КВГ на основі визначення ТКЧ. На рис.1 представлено графік залежності частоти резонатора, виготовленого із матеріалу С300, від температури.

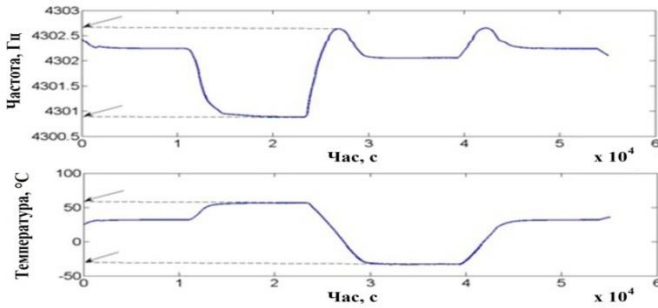


Рис.1. Графік залежності резонансної частоти резонатора, виготовленого із матеріалу С300, від температури

На основі розрахунків визначено, що чутливість частоти до температури для резонаторів зі сплаву С300 дорівнює $0,016 \text{ Гц/}^{\circ}\text{C}$, а зі сплаву 03Н18К9М5Т – $0,06 \text{ Гц/}^{\circ}\text{C}$. Для обох сплавів ця чутливість в 5-10 разів менше, ніж для плавленого кварцу.

Проведено аналіз конструкції резонатору КВГ з отворами на його дні у формі «круг» та «трикутник» (рис.2). Інші форми отворів не розглядалися в зв'язку з їх не технологічністю

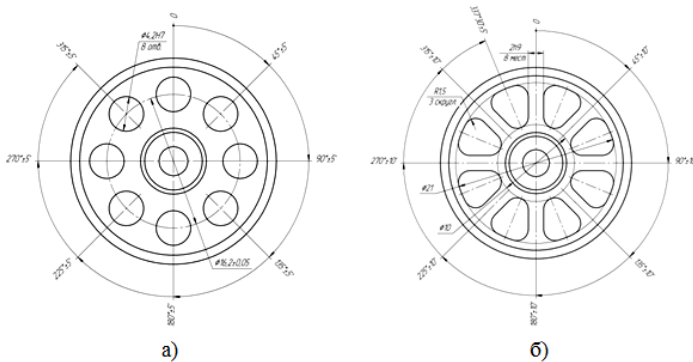


Рис.2. Форма отворів на дні резонатора а) – «круг» та б) – «трикутник»

За допомогою САПР ProENGINEER проаналізовано власні частоти запропонованих конструкцій резонатора комп'ютерним моделюванням та обрано конструкції резонаторів з оптимальними характеристиками. Конструкція резонатора і форма отворів («вікон») в його дні вважається оптимальною, якщо його власні резонансні частоти рознесені більш ніж на 800 Гц.

У представленій вище конструкції є ряд недоліків. Коливання стінок циліндра передаються на його дно з коефіцієнтом передачі значно меншим одиниці. В результаті цього чутливість і точність гіроскопа падає. Крім того, при дії зовнішньої вібрації вздовж осі чутливості (ВЧ) гіроскопа, тобто перпендикулярно дну циліндра, на тонкі і вузькі спиці діє велике

навантаження від важкого, більш товстого обода. В результаті цього поперечна деформація тонкої спиці, до якої кріпиться п'єзодатчик, створює значні похибки, що пропорційні зовнішній вібрації.

Для підвищення чутливості, точності гіроскопа при вимірюванні кутової швидкості і зменшення чутливості до зовнішньої вібрації при роботі, отвори виконуються на твірній поверхні циліндра, а спиці, що утворилися в результаті виконання отворів шліфуються для отримання плоскої поверхні під кріплення п'єзодатчиків (рис.3).

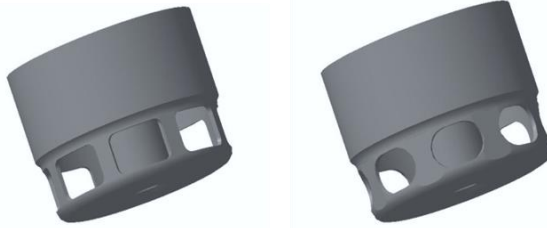


Рис.3. Форми отворів на твірній поверхні циліндра резонатора

При дії зовнішніх збурень вздовж ВЧ, навантаження на спиці діє уздовж поздовжньої її осі. Жорсткість спиць по поздовжній осі значно більше, ніж поперечна жорсткість спиць в конструкції, зазначеної на рис.2.

Виконано підбір виконавчих елементів та датчиків системи керування хвилею КВГ шляхом визначення залежності ємності п'єзокерамічних пластин від температури (рис.4).

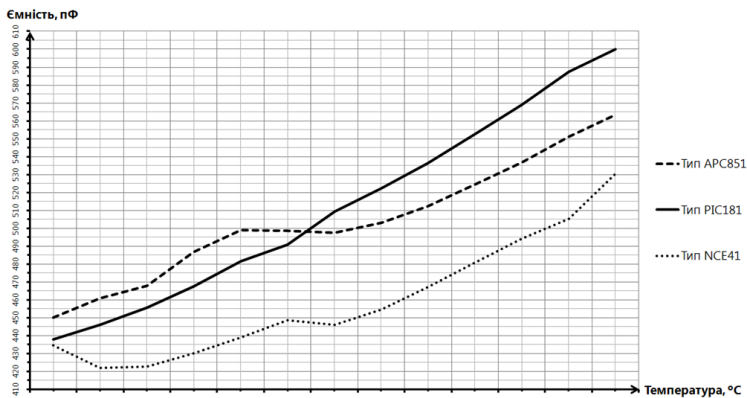


Рис.4. Графік залежності усередненої ємності п'єзодатчиків від температури

Дослідження залежності ємності п'єзодатчиків, приклеєних на резонатор вібраційного гіроскопа, від температури дозволив визначити таку марку п'єзоелектродів (тип PIC181), що дозволяє поліпшити точність корегування температурної похибки приладу.

У другому розділі проведено перевірку зразків основних параметрів металевого резонатору за допомогою розробленого акустичного методу. Спроектване спеціальне робоче місце та визначені резонансні частоти, різночастотності, добротності, різнодобротності зразків резонаторів(рис.5).

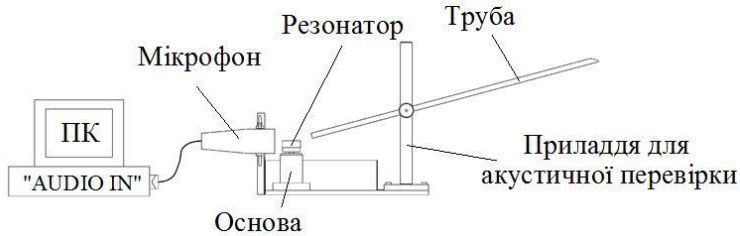


Рис.5. Функціональна схема робочого місця по перевірці акустичних параметрів металевого резонатора

Метод полягає в аналізі звукових коливань в резонаторі після дії механічних збурень. Ці збурення виникають внаслідок контакту металевої кульки, що скочується по трубці приладдя з робочою поверхнею резонатора.

Звукові сигнали, що виникають в результаті зіткнення записуються мікрофоном та оброблюються у цифровому вигляді за допомогою ЕОМ.

Аналіз цих даних дозволяє оцінити правильність проведення операцій термообробки та неоднорідність розподілу маси по окружній координаті резонатора, а також можливість використання резонаторів на подальших етапах збірки.

Проведено оцінку впливу різночастотності на зміщення нуля КВГ.

$$\Delta B_q = 4\delta\varphi A_{ant}\alpha_q Q^3 \left(\frac{\Delta F}{F}\right)^3 + \left[2\delta\varphi A_{ant}\alpha_q \left(\frac{\Delta Q}{Q}\right) Q - 2A_{ant} Q\delta\varphi\Delta\alpha_q \right] \left(\frac{\Delta F}{F}\right), \quad (1)$$

де $\delta\varphi$ – кут між напрямком коливань стоячої хвилі і електродом збудження, α_q – похибка не ортогональності сигналів Коріоліса і квадратури, A_{ant} – амплітуда пучності, Q – добротність резонатора, F – резонансна частота коливань, ΔF – різночастотність.

Проведено оцінку впливу різночастотності та різнодобротності на кут хвилі $\delta\varphi$.

$$\delta\varphi \cong \frac{\Delta F}{2F} Q. \quad (2)$$

Коли виконується співвідношення $\frac{\Delta F}{F} \ll \frac{\Delta Q}{Q}$, кут хвилі визначається різнодобротністю:

$$\delta\varphi \cong \frac{\Delta Q}{2Q}. \quad (3)$$

Визначено допустимі параметри різночастотності ($\Delta F \leq 0,01$ Гц) та кута орієнтації хвилі ($\delta\varphi \leq 2^\circ$) для проведення операції балансування.

Розроблено спеціальне приладдя для приклеювання п'єзокерамічних пластин до резонатора. Проаналізовано вплив похибок, що обумовлені різною жорсткістю, неоднорідністю матеріалу резонатора на основні характеристики КВГ.

Розроблено методику та робоче місце балансування металевго резонатора та визначення дисбалансу мас по четвертій формі дефекту.

На першому етапі балансування різночастотність по 2-м вимірюваним осям визначає 4-та форма дебалансу, яка усувається послідовним зняттям маси в 4-х точках щодо осі з меншою частотою (більшою масою), орієнтація яких щодо важкої осі обчислюється за формулою:

$$\varphi_0 = \pm \frac{1}{2} \arctg \frac{N}{A_{nr}}. \quad (4)$$

Знак φ_0 залежить від фази сигналу вузла по відношенню до пучності ($0^\circ - 180^\circ$):

- при 0° – кут позиціонування знаходиться за годинниковою стрілкою щодо важкої осі;
- при 180° – кут позиціонування знаходиться проти годинникової стрілкою щодо важкої осі.

Величина маси Δm , яку необхідно видалити, визначається за формулою:

$$\Delta m = \left(\frac{\Delta F}{F} \right) M, \quad (5)$$

де M – модальна маса.

Враховуючи ці умови побудовано програму проведення балансування металевго резонатора.

Для проведення розрахунків була розроблена спеціальна електронна таблиця. Вносячи до якої параметри резонансної частоти, амплітуд пучності і вузла, фазність амплітуд по осях 1 і 2, вона автоматично визначає різночастотність, кут орієнтації хвилі збудження по осях 1 і 2, значення маси металу, яку необхідно видалити з кромки резонатора і кути точок зняття маси.

Враховуючи властивості параметрів, що необхідно виміряти та умови для позиціонування резонатора при знятті неврівноваженої маси резонатора запропонована уніфікована схема робочого місця, що дозволяє не переставляючи резонатор на окремі місця провести діагностику параметрів та видалення матеріалу з кромки резонатора. Функціональна схема робочого місця для балансування приведена на рис.6

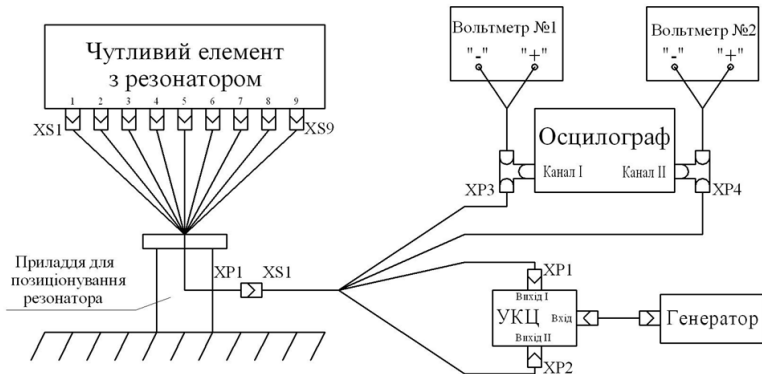


Рис.6. Функціональна схема робочого місця для балансування резонатора у складі генератора коливаний

Проведено оцінку впливу неортогональності осі чутливості чутливого елементу до монтажної поверхні КВГ. Визначено кути не ортогональності дослідного зразка.

У **третьому розділі** розглянуто шляхи підвищення точності систем стабілізації бортових систем навігації та керування рухом. Проведено аналіз приладового складу, структури та динамічних параметрів блоків стабілізаторів, який показав необхідності заміни роторних гіротахometrів, виконавчих двигунів та підвищення швидкості обробки інформації в цифровому блоці керування.

Розглянуто режими роботи КВГ, які можуть використовуватися в якості чутливих елементів сучасних стабілізаторів озброєння.

Всі типи КВГ можуть працювати в різноманітних режимах:

1. Режим роботи без зворотного зв'язку, коли хвиля, збуджена силами Коріоліса, амплітуда якої пропорційна вимірюваній кутовій швидкості, не керується. При обертанні, кут повороту хвилі пропорційний кутовій швидкості обертання.

2. Режим роботи зі зворотним зв'язком, що компенсує хвилю, збуджену силами Коріоліса. В цьому випадку сигнал зворотного зв'язку пропорційний вимірюваній кутовій швидкості (КВГ-ДКШ).

3. Диференціальний режим роботи, коли зворотні зв'язки, компенсуючі коріолісову хвилю, зберігаються, а додатково поданий сигнал керування виставляє вібраційну хвилю між електродами. В цьому випадку виникають два сигнали, в яких кутова швидкість, що вимірюється, міститься з протилежними знаками і їх різниця подвоює сигнал кутової швидкості та компенсує похибки, рівні в обох сигналах (КВГ-ДКШ-Д).

4. Режим роботи з компенсацією тільки квадратурної компоненти сигналу (інтегруючий режим). В інтегруючому режимі роботи сили Коріоліса не компенсуються і в результаті накладання двох хвиль: первинної

та вторинної, вібраційна стояча хвиля повертається вслід за обертанням корпусу КВГ з затримкою, що рівна коефіцієнту Брайана $k \approx 0,4$ (КВГ-I).

В перших трьох режимах КВГ вимірює кутову швидкість та є датчиком кутової швидкості. В четвертому режимі КВГ вимірює кут повороту та є інтегруючим гіроскопом.

Була розроблена математична модель КВГ та реалізована у вигляді блок-схеми Matlab-Simulink, як датчика кутової швидкості зі зворотним зв'язком, на базі звісної узагальненої моделі двомірних коливань резонатору, що представляється наступними рівняннями::

$$\begin{aligned} \ddot{x} - k(2\Omega\dot{y} + \dot{\Omega}y) + \frac{2}{\tau}\dot{x} + \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)(\dot{x}\cos 2\theta_\tau + \dot{y}\sin 2\theta_\tau) + (F^2 - k'\Omega^2)x \\ - F\Delta F(x\cos 2\theta_F + y\sin 2\theta_F) = f_x; \\ \ddot{y} + k(2\Omega\dot{x} + \dot{\Omega}x) + \frac{2}{\tau}\dot{y} - \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)(-\dot{x}\sin 2\theta_\tau + \dot{y}\cos 2\theta_\tau) + (F^2 - k'\Omega^2)y \\ + F\Delta F(-x\sin 2\theta_F + y\cos 2\theta_F) = f_y, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{де } F^2 = \frac{F_1^2 + F_2^2}{2}; \quad F\Delta F = \frac{F_1^2 - F_2^2}{2}; \quad \frac{1}{\tau} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2}\right); \quad \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right) = \frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2}.$$

У цих рівняннях, які описують коливання первинної моди по осі X і вторинної моди по осі Y , називаються рівняннями в швидких змінних, так як відхилення x та y від рівноважного положення резонатора по обох координатах відбуваються з частотою близькою до резонансної. У цих рівняннях враховано, що в резонаторі є дві осі з максимальною F_1 і мінімальною F_2 резонансними частотами коливань. Також, є дві осі з мінімальним τ_1 і максимальним τ_2 часом згасання вільних коливань. Причому, вісь мінімальної резонансної частоти має кут θ_F з напрямком первинних коливань, а вісь мінімальної добротності становить кут θ_τ з напрямком первинних коливань.

Зворотній зв'язок по осі Y виробляє силу f_x , яка компенсує коливання по осі Y :

$$f_x = A_0 F_x \left[2k\Omega + \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right) \sin 2\theta_\tau \right] \sin F_x t + A_0 F_x \Delta F_x \sin 2\theta_F \cos F_x t. \quad (7)$$

При цьому, вимірювана кутова швидкість Ω виходить шляхом демодуляції напруги в контурі негативного зворотного зв'язку опорним сигналом $\sin F_x t$. Демодуляція сигналу зворотного зв'язку опорним сигналом $\cos F_x t$ виділяє квадратурний сигнал, пропорційний різниці частот ΔF , яка також компенсується для мінімізації похибки вимірювання.

Амплітудна демодуляції опорним сигналом $\sin F_x t$ виділяє амплітуду першого доданка виразу (7). Кутова швидкість визначається наступним виразом:

$$\Omega = \frac{1}{SF} \cdot \text{demod}\{f_x\}|_{\sin F_x t} + B, \quad (8)$$

де SF – масштабний коефіцієнт КВГ-ДКШ, B – зміщення нуля КВГ-ДКШ.

$$SF = 2kF_x A_0; \quad B = \frac{1}{2k} \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right) \sin 2\theta_\tau. \quad (9)$$

Розглянуто математичну модель роботи КВГ в диференціальному режимі, коли зворотні зв'язки, компенсуючи Коріолісову хвилю, зберігаються, а додатково поданий сигнал керування виставляє вібраційну хвилю між електродами.

Компенсація похибок вимірювання кутової швидкості забезпечується за рахунок застосування диференціального методу вимірювання кутової швидкості шляхом алгоритмічної реалізації двох осей чутливості в одному резонаторі КВГ, кут між якими дорівнює 180 град.

Модель КВГ-ДКШ-Д представлена у вигляді:

$$\begin{aligned} 4k\sqrt{D_x D_y} \Omega + D_y d_{yy} - D_x d_{xx} &= K_y G_y D_y - K_x G_x D_x; \\ 2d_{xy}\sqrt{D_x D_y} + D_y d_{yy} + D_x d_{xx} &= K_y G_y D_y + K_x G_x D_x, \end{aligned} \quad (10)$$

де k – коефіцієнт Брайана; d_{xx}, d_{yy} – коефіцієнти демпфування коливань резонатора по осях X і Y , відповідно; $d_{yx}=d_{xy}$ – коефіцієнти перехресного демпфування; K_x, K_y – компоненти сигналу управління по осях X і Y , що впливають на демпфування; G_x, G_y – коефіцієнти перетворення електричної напруги, поданої на електроди по осях X і Y , в силу; D_x, D_y – коефіцієнти перетворення електродами механічної деформації в електричну напругу по осях X і Y , відповідно.

В правій частині цих рівнянь стоять вимірювальні величини. З лівої частини першого рівняння видно, що масштабний коефіцієнт КВГ-ДКШ-Д дорівнює:

$$SF = 4k\sqrt{D_x D_y}, \quad (11)$$

а зміщення нуля дорівнює:

$$B = D_y d_{yy} - D_x d_{xx}. \quad (12)$$

Як видно з співвідношень, КВГ-ДКШ-Д не залежить від резонансної частоти і від амплітуди коливань, але залежність від коефіцієнтів електродів D_x, D_y зберігається. У зміщенні нуля B відсутнє перехресне демпфування d_{xy} .

У інтегруючому режимі роботи КВГ (КВГ-І) сила Коріоліса, яка виникає внаслідок обертання вібраційної структури, не компенсується і викликає обертання вібраційної хвилі в бік обертання резонатора. На будь-якому часовому інтервалі кут повороту хвилі пропорційний куту повороту резонатора (а разом з ним і всього гіроскопа) відносно інерційного простору.

$$\begin{aligned} y &= a \sin \left(\theta_0 - k \int_t^{t_0} \Omega(t') dt' \right) \cos(\omega t + \varphi') - q \sin * \\ &\quad * \left(\theta_0 - k \int_t^{t_0} \Omega(t') dt' \right) \sin(\omega t + \varphi'); \\ x &= a \cos \left(\theta_0 - k \int_t^{t_0} \Omega(t') dt' \right) \cos(\omega t + \varphi') - q \sin * \\ &\quad * \left(\theta_0 - k \int_t^{t_0} \Omega(t') dt' \right) \sin(\omega t + \varphi'). \end{aligned} \quad (13)$$

Рівняння (13) показують, що під час відсутності зовнішніх сил і демпфування, траєкторія руху матеріальної точки резонатора в процесі коливань обертається при обертанні резонатора з кутовою швидкістю Ω з відставанням по куту на коефіцієнт Брайана:

$$k = \frac{n}{n^2 + 1 + \frac{3}{n^2} \left(\frac{r}{h}\right)^2}, \quad (14)$$

де n – номер моди коливань, $n = 2$, r – радіус циліндра, h – висота циліндра.

Розроблена повна нелінійна Matlab-Simulink-модель КВГ, що реалізує всі його режими роботи та має можливість автоматичного перемикання з режиму на режим.

У **четвертому розділі** розроблено методику проведення температурної корекції фаз сигналів квадратури та амплітуди збудження, що впливають на зміщення нуля КВГ.

Похибки настроювання фаз сигналів призводять до того, що їх ортогональність порушується, і тоді частина квадратурної компоненти сигналу потрапляє до сигналу кутової швидкості і підсумовується зі зміщенням нуля, а до квадратурної компоненти потрапляє сигнал кутової швидкості. За результатами вимірювання значень α_Q та α_E на різних температурах з діапазону $[-40 \dots +75]^\circ\text{C}$ визначено, що для їх корекції достатньо апроксимувати залежності α_E та α_Q від температури T кривою другого порядку:

$$\begin{aligned} \alpha_Q(T) &= a_{0Q} + a_{1Q}T + a_{2Q}T^2; \\ \alpha_E(T) &= c_{0E} + c_{1E}T + c_{2E}T^2, \end{aligned} \quad (15)$$

де a_{0Q} , a_{1Q} , a_{2Q} , c_{0E} , c_{1E} , c_{2E} – коефіцієнти корекції α_Q та α_E по температурі.

На рис.7 представлено результат впливу корекції α_Q та α_E на зміщення нуля КВГ та його дрейф.

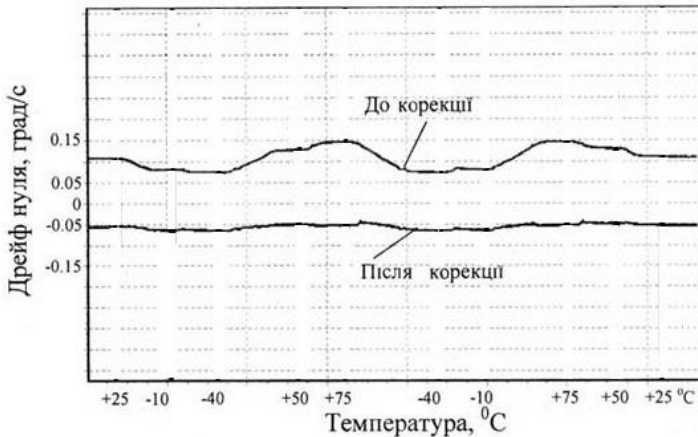


Рис.7. Дрейф нуля КВГ до та після корекції α_Q та α_E

Температурна корекція фазових неузгодженостей зменшує середнє значення зміщення нуля вібраційного гіроскопа з металевим резонатором в 3 рази, а варіацію дрейфу зміщення нуля в 4,5 разів.

Розроблено температурну поліноміальну модель вихідного сигналу КВГ, як зв'язок між його входом і виходом. Підвищення точності температурної компенсації вихідного сигналу гіроскопа забезпечується за рахунок додаткових вимірювань резонансної частоти, сигналу квадратури та сигналу збудження, які забезпечують повніший і точніший опис змін вихідного сигналу вібраційного гіроскопа при зміні температури.

Додаткові сигнали вводяться в модель вихідного сигналу у вигляді полінома, а для визначення коефіцієнтів полінома використовується метод множинної регресії, який дозволяє отримувати стійкі оцінки коефіцієнтів за наявності шуму у вимірюваних сигналах.

$$\vec{a} = (X^T X)^{-1} X^T \vec{V},$$

$$X = \begin{pmatrix} T_1 & T_1^2 & T_1^3 & A_{зб1} & A_{зб1}^2 & A_{зб1}^3 & A_{КВ1} & A_{КВ1}^2 & A_{КВ1}^3 & f_1 & f_1^2 & f_1^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T_n & T_n^2 & T_n^3 & A_{збn} & A_{збn}^2 & A_{збn}^3 & A_{КВn} & A_{КВn}^2 & A_{КВn}^3 & f_n & f_n^2 & f_n^3 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Середньоквадратична похибка компенсації сигналу в діапазоні температур дорівнює 0,038 %, що у 10 разів менше ніж за способом існуючої моделі (0,4 %).

Підвищення точності температурної компенсації масштабованого коефіцієнта (МК) гіроскопа забезпечується за рахунок додаткових вимірювань сигналів частоти вібрації, амплітуди збудження і амплітуди квадратури, які забезпечують повніший і точніший опис змін МК вібраційного гіроскопа, особливо при зміні температури, враховуючи похибки, які виникають при розузгодженні фаз сигналів керування, а також змін коефіцієнтів підсилення електродів збудження вібрації та зняття інформації про вібрацію.

На стабілізованих температурах значення МК практично рівні між собою, проте при зміні температури, значення МК істотно відрізняються. Крім того, виникає гістерезис МК(рис.8).

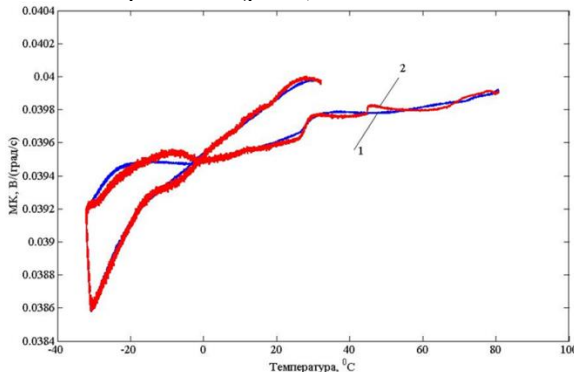


Рис.8. Значення МК в діапазоні температур

Додаткові сигнали вводяться в модель МК у вигляді полінома, а для визначення коефіцієнтів полінома використовується метод множинної регресії.

$$\begin{pmatrix} SF_0 \\ \vec{f} \\ \vec{a} \\ \vec{q} \\ \vec{t} \end{pmatrix} = (M^T M)^{-1} M^T \begin{pmatrix} SF_1 \\ \vdots \\ SF_n \end{pmatrix}, \quad (17)$$

$$M = \begin{pmatrix} 1 & \Delta F_1 & \dots & \Delta F_1^{n_1} & \Delta A_1 & \dots & \Delta A_1^{n_2} & \Delta Q_1 & \dots & \Delta Q_1^{n_3} & \Delta T_1 & \dots & \Delta T_1^{n_4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \Delta F_n & \dots & \Delta F_n^{n_1} & \Delta A_n & \dots & \Delta A_n^{n_2} & \Delta Q_n & \dots & \Delta Q_n^{n_3} & \Delta T_n & \dots & \Delta T_n^{n_4} \end{pmatrix}.$$

Різниця між кривими 1 і 2 рис.9 визначає похибку компенсації МК. Середньоквадратична похибка компенсації МК в діапазоні температур дорівнює 0,057%, що у 10 разів менше ніж за способом існуючої моделі (0,6 %).

Розроблено методики паспортизації основних параметрів КВГ: діапазон вимірювання кутових швидкостей, повторюваність МК, не лінійність МК, стабільність зміщення нуля, повторюваність зміщення нуля від включення до включення, випадковий ухил як в нормальних умовах, так і в діапазоні температур.

Проведено випробування макетного зразку КВГ на чутливість зміщення нуля до вібрації та ударів. Чутливість зміщення нуля КВГ до вібраційних збурень у діапазоні частот до 120 Гц є не більше 0,01 град/с/4g = =0,0025 град/с/g, а чутливість зміщення нуля КВГ до удару в діапазоні ударних прискорень до 100g тривалістю 2мс, не перевищує 10^{-4} град/с/g.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено поставлену задачу обґрунтування та розробки конструкції чутливого елементу вібраційного гіроскопа, що працює в режимі вимірювання кутової швидкості і забезпечує високу чутливість при вимірюванні малих кутових швидкостей, широкий діапазон вимірювання кутових швидкостей та достатньо високу стійкість до вібро-ударних прискорень, забезпечено корекцію зміщення нуля, масштабного коефіцієнту та мінімізовано вплив сигналу квадратури на сигнал кутової швидкості при зміні температури.

Отримано наступні нові результати:

1. Проведено порівняння двох конструкцій металевих циліндричних резонаторів з отворами на дні та на твірній поверхні циліндру. Шляхом розрахунків і комп'ютерного моделювання обґрунтовані переваги другого варіанту конструкції над першим у частині вібро-ударостійкості; проведено аналіз отворів різної геометрії. Виявлено їх вплив на резонансні частоти коливань циліндричного резонатору. Вироблено рекомендації щодо геометрії резонатора та його елементів; удосконалено конструкцію основи, на яку

встановлюється новий розроблений резонатор з отворами на твірній поверхні циліндру; експериментально обґрунтовано вибір п'єзoeлектродів, що використовуються для збудження коливань і вимірювання сигналів металевого резонатору.

2. Розроблено методику та обладнання для робочого місця безелектродного вимірювання динамічних параметрів металевого резонатора після його виготовлення; проведено оцінку впливу різночастотності, кута хвилі і похибок позиціонування п'єзoeлектродів на зміщення нуля та масштабний коефіцієнт КВГ; розроблено конструкцію приладдя для приклеювання п'єзoeлектродів до резонатора нової конструкції; визначено допустимі параметри резонаторів: різночастотності $\Delta F \leq 0,01$ Гц та кут орієнтації хвилі $\delta\varphi \leq 2^\circ$.

3. Представлено теоретичні основи динамічного балансування металевого резонатора для зменшення параметрів різночастотності та кута орієнтації хвилі; розроблено методику балансування металевого резонатора та визначення дисбалансу мас по четвертій формі дефекту; розроблено робоче місце для балансування резонатора, проведено балансування дослідних зразків генераторів коливань та визначено їх основні характеристики.

4. Проведено оцінку впливу неортогональності осі чутливості чутливого елементу до монтажно́ї поверхні КВГ. Визначено кути не ортогональності дослідного зразка ($\alpha = 0,1^\circ$, $\beta = 0,12^\circ$).

5. Розроблено базову математичну модель роботи КВГ, як датчика кутової швидкості зі зворотним зв'язком, що компенсує хвилю, збуджену силою Коріоліса. Розроблено блок-схему управління КВГ-ДКШ та описано кожну з його ланок.

6. Розроблено математичну модель роботи КВГ в диференціальному режимі, коли зворотні зв'язки, компенсуючи Коріолісову хвилю, зберігаються, а додатково поданий сигнал керування виставляє вібраційну хвилю між електродами. Кутова швидкість, що вимірюється, міститься з протилежними знаками і їх різниця подвоює сигнал кутової швидкості та компенсує похибки. Проведено випробування чутливості дослідного зразка КВГ-ДКШ-Д до уданих навантажень вздовж осі чутливості. Дослід показав, що пікові значення каналу $(X - Y)/2$ менші пікових значень X чи Y в 39 раз при ударах 5g, в 2 рази менші при ударах 20g та в 2,5 рази менші при ударах 100g.

7. Розглянуто математичну модель інтегруючого режиму роботи КВГ, коли сила Коріоліса не компенсується і викликає обертання вібраційної хвилі в бік обертання резонатора. Побудовано блок схему та Matlab-Simulink-модель КВГ-I та проаналізована робота КВГ-I при швидкості обертання 90 град/с.

8. Розроблена повна нелінійна MatlabSimulink-модель КВГ, що реалізує всі його режими роботи: КВГ-ДКШ, КВГ-ДКШ-Д, КВГ-I. Ця схема

реалізує багаторежимний ДКШ з можливістю автоматичного перемикання з режиму на режим.

9. Розглянуто алгоритми корекції зміщення нуля, масштабного коефіцієнта, і інших специфічних параметрів КВГ, що поліпшують його точність при роботі в широкому діапазоні температур. Розглянуто варіанти каліброваних процедур, що скорочують час випробувань та поліпшують точність калібрування.

10. Розроблено методику проведення температурної корекції фаз сигналів квадратури та амплітуди, що впливають на зміщення нуля КВГ. Визначення корекційних коефіцієнтів та введення їх в алгоритм роботи дозволило зменшити середнє значення зміщення нуля в 3 рази, а варіацію дрейфу зміщення нуля в 4,5 рази.

11. Розроблено температурну поліноміальну модель вихідного сигналу КВГ, як зв'язок між його входом і виходом. Визначення корекційних параметрів полінома та введення їх в алгоритм роботи КВГ дозволило зменшити середньоквадратичну похибку компенсації сигналу до 0,038%, що у 10 разів менше, ніж за існуючими моделями.

12. Розроблено температурну модель масштабного коефіцієнта та запропоновано новий метод компенсації його температурної похибки. Визначення корекційних параметрів полінома методом множинної регресії та введення їх у алгоритм роботи КВГ дозволило скоротити середньоквадратичну похибку компенсації МК до 0,057%, що у 10 разів менше, ніж за існуючими моделями.

13. Проведено випробування макетного зразку КВГ на чутливість зміщення нуля до вібрації. Чутливість зміщення нуля КВГ до вібраційних збурень становить 0,0025 град/с/г.

14. Проведено випробування макетного зразку КВГ на чутливість зміщення нуля до ударів. Чутливість зміщення нуля до ударних прискорень 100g тривалістю 2 мс, не перевищує 10^{-4} град/с/г.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у фахових виданнях:

1. Petrenko O.V. Temperature correction of the signal phases in a vibratory gyroscope /O.V.Petrenko // Polish journal of science. — Warszawa, Poland, 2019. — №15(1). — PP.30-34.

Здобувачем запропоновано методику температурної корекції фаз сигналів квадратури та кутової швидкості.

2. Bezvesilna O. Devising and introducing a procedure for measuring a dynamic stabilization error in weapon stabilizers / Bezvesilna O., Petrenko O., Halytskyi V., Ilchenko M. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information and controlling system – Kharkiv, 2020. – №1/9(103) 2020. – PP. 39-45.

Здобувачем проведено визначення динамічної похибки стабілізації стабілізатора озброєння, до складу якого входить Коріолісовий вібраційний гіроскоп.

Видання входить до переліку наукових фахових видань України, включено до міжнародних наукометричних баз: Scopus, CrossRef, Index Copernicus, DOAJ, SIS та ін.

3. Петренко О.В. Виконавчі елементи та датчики системи керування хвилею Коріолісового вібраційного гіроскопа /О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади». — Луцький національний технічний університет, Луцьк, 2019. — №14. — С.103-108.

Здобувачем надано основні параметри п'єзодатчиків та проведено розрахунок співвідношення між напругами на виході від напруги, яка подається на вхід п'єзодатчиків.

Видання входить до переліку наукових фахових видань України, включено до Google Scholar та ін.

4. Безвесільна О.М. Інтегруючий режим вібраційного гіроскопа з металевим циліндричним ротором /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Вісник Хмельницького технічного університету. Технічні науки — Хмельницький, 2019. — №4(275). — С.169-175.

Здобувачем побудовано Simulink-модель КВГ, який працює в якості датчика кута.

Видання входить до переліку наукових фахових видань України, включено до Index Copernicus, Google Scholar та ін.

5. Петренко О.В. Багатопараметрична модель дрейфу вібраційного гіроскопа /О.В. Петренко // Вісник Інженерної академії України. — Київ, 2016. — №2. — С.93-97.

Здобувачем розроблено алгоритм багатопараметричної корекції дрейфу нуля КВГ.

Видання входить до переліку наукових фахових видань України.

6. Цірук В.Г. Не ортогональності осі чутливості до монтажноі поверхні вібраційного гіроскопа /В.Г. Цірук, О.В. Петренко, Г.В. Цірук // Вісник Інженерної академії України. — Київ, 2017. — №3. — С.158-160.

Здобувачем проведено розрахунок допустимих величин відхилення осей чутливого елементу відносно монтажноі поверхні.

Видання входить до переліку наукових фахових видань України.

7. Безвесільна О.М. Шляхи підвищення точності приладових стабілізаторів /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки — Хмельницький національний університет, Хмельницький, 2019. — №3(273). — С.158-163.

Здобувачем проведено оцінку впливу полоси пропускання та дискретності обчислювальних операцій виробів ГТ-46, КВГ, МЕМС та ВОГ на точності характеристики системи стабілізації.

Видання входить до переліку наукових фахових видань України, включено до Index Copernicus, Google Scholar та ін.

8. Безвесільна О.М. Вибір робочого діапазону кутів тахометра для виробів легкої броньованої техніки /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Вісник Херсонського національного технічного університету. — 2019. — №2(69). — С.21-25.

Здобувачем проведено аналіз вихідних характеристик тахометра.

Видання входить до переліку наукових фахових видань України, включено до Google Scholar, eLibrary та ін.

Статті у інших виданнях:

9. Петренко О.В. Design analysis and parameters choice of metallic cylindrical resonator sensor for coriolis vibratory gyroscope /О.В. Петренко // Electronics and Control Systems . — NAU, Kyiv, 2014. — №2(40). — PP.87-91.

Здобувачем проведено розрахунок параметрів та моделювання металевих резонаторів з отворами на дні та на твірній поверхні циліндру.

10. Безвесільна О.М. Оцінка впливу конструкції кронштейна для установки приладів ГТ46, ГТ46-01 на їх вихідні сигнали /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Науковий журнал «Молодий вчений». — Видавництво «Молодий вчений» 2019. — №7(71). — С.43586.

Здобувачем проаналізовано спектограми та діаграми випробувань гіротахометрів, встановлених на кронштейни консольної та жорсткої конструкції.

11. Безвесільна О.М. Дослідження можливості підвищення рівномірності вихідної характеристики тахометра /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Науковий журнал «Молодий вчений». — 2019. — №8(72). — С.149-152.

Здобувачем проведення дослідження різних варіантів виконань тахогенератора.

12. Безвесільна О.М. Визначення смуги пропускання електромеханічних гіротахометрів /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Науковий журнал «Молодий вчений». — 2019. — №9(73). — С.219-226.

Здобувачем проаналізовано амплітудно-частотні та фазо-частотні характеристики гіротахометрів та визначено смуги пропускання.

Патенти України:

13. Пат. на винахід 111408 Україна, МПК G01C 19/56. Спосіб компенсації температурної погрішності масштабного коефіцієнта вібраційного гіроскопа / Маляров С.П., Цірук В.Г., Чіковані В.В., Петренко О.В.; заявник та власник Маляров С.П., Цірук В.Г., Чіковані В.В., Петренко О.В. — №a201409707; заявл. 04.09.2014; опубл. 25.04.2016, Бюл. №8.

Здобувачем запропоновано використовувати поліноміальну модель залежності масштабного коефіцієнту від температури, а калібрувальні коефіцієнти обчислювати методом множинної регресії.

14. Пат. на корисну модель 121394 Україна, МПК G01C 19/56. Вібраційний гіроскоп з компенсацією зміщення нуля / Петренко О.В., Цірук В.Г., Цірук Г.В., Крамаренко М.М.; заявник та власник Публічне акціонерне товариство «Науково-виробниче об'єднання «Київський завод автоматики». — №u201703313; заявл. 06.04.2017; опубл. 11.12.2017, Бюл. №23.

Здобувачем запропоновано використовувати блок формування швидкості відхилення резонатора від його рівноважного положення для компенсації зміщення нуля КВГ.

15. Пат. на корисну модель 127341 Україна, МПК H02K 3/00. Електричний двигун постійного струму / Безвесільна О.М., Мірошник С.В., Маляров С.П., Петренко О.В., Цірук В.Г., Цірук Г.В.; заявник та власник Публічне акціонерне товариство «Науково-виробниче об'єднання «Київський завод автоматики». — №u201802152; заявл. 02.03.2018; опубл. 25.07.2018, Бюл. №14.

Здобувачем розроблена схема укладки секцій двигуна.

Тези доповідей у збірниках матеріалів конференцій:

16. Петренко О.В. Дослідження залежності ємності п'єзодатчиків від температури в складі чутливого елемента вібраційного гіроскопа / О.В. Петренко, В.Г. Цірук // XI Міжнародна науково-технічна конференція «Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки». — 13-14 квітня, Київ, 2017. — С.56-59.

Здобувачем проведено вимірювання ємностей п'єзодатчиків в діапазоні температур.

17. Chikovani V.V. Vibratory gyroscope scale factor multi-parametric calibration / V.V. Chikovani, O.B. Petrenko // IEEE 3rd International Conference «Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)». — 14-17 Oct., NAU, Kyiv, 2014. — PP.129-131.

Здобувачем запропоновано використовувати поліноміальну модель залежності масштабного коефіцієнту від температури, а калібрувальні коефіцієнти обчислювати методом множинної регресії.

18. Петренко А.В. Результаты испытаний виброскопа гироскопа с металлическим резонатором на чувствительность смещения нуля к внешним вибрациям и ударам / А.В. Петренко // Восьма міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ПРТК-2015)». — 18-19 травня, НАУ, Київ, 2015. — С.300-302.

Здобувачем проведено оцінку впливу вібраційних та ударних збурень на зміщення нуля КВГ.

19. Петренко А.В. Балансировка металлического резонатора виброскопа гироскопа / А.В. Петренко // XIII Міжнародна науково-

технічна конференція «Авіа-2017». — 19-21 квітня, НАУ, Київ, 2017. — С.9.46-9.50.

Здобувачем приведені теоретичні основи балансування металевих резонаторів вібраційних гіроскопів.

20. Petrenko O.V. Damper for vibratory gyroscope that is used in rigid conditions with mechanical impact /O.V. Petrenko, H.V. Tsiрук // The seventh world congress «Aviation in the XXI-st century. Safety in aviation and space technologies». — 19-21 Sept., NAU, Kyiv, 2016. — PP.3.3.51-3.3.55.

Здобувачем розроблено конструкцію демпферів та проведено випробування стійкості КВГ до ударних збурень.

21. Chikovani V.V. Precise vibratory gyroscope based on resonator made of elinvar alloy /V.V. Chikovani, O.V. Petrenko, H.V. Tsiрук // The sixth world congress «Aviation in the XXI-st century». — 23-25 Sept., NAU, Kyiv, 2014. — №2. — PP.3.5.34-3.5.38.

Здобувачем розроблено конструкцію демпферів та проведено випробування стійкості КВГ до ударних збурень.

22. Петренко О.В. Температурна модель масштабного коефіцієнта вібраційного гіроскопа /О.В. Петренко // XII Міжнародна науково-технічна конференція «Авіа-2015». — 28-29 квітня, Київ, 2015. — С.39.67-39.71.

Здобувачем розроблено методику корекції масштабного коефіцієнту при зміні температури.

23. Безвесільна О.М. Усунення взаємовпливу каналів вертикального та горизонтального наведення в výroбах легкої бронетехніки /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // XII міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ПРТК-2019)». — 21-22 травня, НАУ, Київ, 2019. — С.262-264.

Здобувачем запропоновано введення додаткових ланок корекції.

24. Безвесільна О.М. Випробування енкадера для використання у гіроскопічних приладах /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Міжнародна наукова інтернет-конференція «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення». — 9 липня, Тернопіль, 2019. — №40. — С.76-79.

Здобувачем розроблено робоче місце по перевірці енкадера типу РМКЗВІ.

25. Безвесільна О.М. Розширення діагностики відмов стабілізаторів /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Матеріали науково-практичної конференції «Сучасні світові тенденції розвитку науки, технологій та інновацій». — 28-29 червня, Ужгород, Видавництво «Молодий вчений» 2019. — С.44-49.

Здобувачем наведено структурну схему стабілізатора озброєння та таблицю формування аварійної інформації стабілізатором.

26. Петренко О.В. Балансування металевого резонатора вібраційного гіроскопа /О.В. Петренко, Г.В. Цірук // Всеукраїнська науково-технічна конференція «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації,

спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM». — НАУ, Київ, 2018. — С.82.

Здобувачем наведено теоретичні основи балансування металевих резонаторів.

27. Безвесільна О.М. Автоматичне налаштування стабілізаторів /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Міжнародна науково-практична конференція «Die Relevanz und die Neuheit der modernen wissenschaftlichen Studien». — 23 Jul., Австрія, Відень, 2019. — №3. — С.44-46.

Здобувачем описано механічні параметри стабілізаторів озброєння, що впливають на налаштування.

28. Петренко О.В. Шляхи підвищення точності стабілізації /О.В.Петренко, М.В.Ільченко // VII науково-технічна конференція «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики і України. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки». — 9-10 жовтня, Київ, 2019. — С.216-217.

Здобувачем запропоновано використовувати КВГ в якості чутливих елементів системи стабілізації.

29. Chikovani V. Features of Design of Coriolis Vibratory Gyroscopes Assigned for Unmanned Aerial Vehicles / Valeriy Chikovani, Olga Sushchenko, O.V. Petrenko and S. Egorov // 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD-2019).— October 22-24, Kyiv, 2019. — PP.194-198

Здобувачем розроблено конструкцію КВГ з металевим резонатором.

АНОТАЦІЯ

Петренко О. В. Удосконалення методів підвищення точності вібраційного гіроскопа з металевим циліндричним резонатором. – На правах рукопису.

Дисертаційна робота на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.03 – гіроскопи та навігаційні системи – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Міністерство освіти та науки України, Київ, 2020.

Дисертаційна робота присвячена науковому обґрунтуванню та розробці алгоритмів компенсації внутрішніх похибок та зовнішніх збурень у Коріолісовому вібраційному гіроскопі, а також удосконаленню його складових частин (резонатора, чутливого елемента).

Автором розроблено методику та обладнання для робочого місця безелектродного вимірювання динамічних параметрів металевого резонатора після його виготовлення, розроблено конструкцію приладдя для приклеювання п'єзоелектродів до резонатора нової конструкції, методику та обладнання робочого місця для балансування мас. Розроблено та

відпрацьовано на експериментальному зразку КВГ методики температурної корекції фаз сигналів квадратури та кутової швидкості, багатопараметричної корекції дрейфу нуля і масштабного коефіцієнту, що призводить до збільшення точності виміру кутової швидкості в умовах дії температурних градієнтів.

Ключові слова: вібраційний гіроскоп, металевий резонатор, режим вимірювання кутової швидкості, зміщення нуля, масштабний коефіцієнт, корекція, зовнішні збурення.

АННОТАЦИЯ

Петренко А. В. Усовершенствование методов повышения точности вибрационного гироскопа с металлическим цилиндрическим резонатором. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.03 – гироскопы и навигационные системы – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Министерство образования и науки Украины, Киев, 2020.

Диссертация посвящена научному обоснованию и разработке алгоритмов компенсации внутренних погрешностей и внешних возмущений в Кориолисового вибрационном гироскопе, а также совершенствованию его составных частей (резонатора, чувствительного элемента).

Автором разработана методика и оборудование для рабочего места безэлектродного измерения динамических параметров металлического резонатора после его изготовления, разработана конструкция приспособления для приклеивания пьезоэлектродов к резонатору новой конструкции, методику и оборудование рабочего места для балансировки масс резонатора. Разработано и отработано на экспериментальном образце КВГ методики температурной коррекции фаз сигналов квадратуры и угловой скорости, многопараметрической коррекции дрейфа нуля и масштабного коэффициента, что приводит к увеличению точности измерения угловой скорости в условиях действия температурных градиентов;

Ключевые слова: вибрационный гироскоп, металлический резонатор, режим измерения угловой скорости, смещение нуля, масштабный коэффициент, коррекция, внешние возмущения.

SUMMARY

Petrenko O. V. “Improvement of methods for higher accuracy of a vibrating gyroscope with a metal cylindrical resonator”. - On the rights of manuscripts.

Thesis for a candidate of sciences degree in specialty 05.11.03 – gyroscopes and navigation systems – National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2020.

In the thesis the following new scientific results are obtained:

1. For the first time, a multi-parameter method of CVG scale factor correction is developed and implemented, which can be used during the CVG operation in the rate and in the differential modes. Ukraine patent have been obtained for this method.

2. Scientifically grounded analysis of a new design of a cylindrical resonator with holes on the walls of a cylinder having higher vibration resistance was first developed and carried out.

3. The multiparameter bias correction algorithm has been developed and implemented, which has advantages over the existing ones by accuracy.

4. For the first time experimental researches were carried out on a manufactured experimental sample of CVG with developed metal cylindrical resonator made of elenvar elloy, which showed high accuracy scale factor and bias drift correction under the action of temperature gradient, as well as high shock-vibration resistance of the sample.

The practical significance of thesis results are:

- comparison of two designs of metallic cylindrical resonators with holes on the bottom and on the wall of the cylinder and by calculations and computer simulation the advantages of the second design over the first one in the part of shock resistance have been substantiated;

- an analysis of the different geometries of the holes has been made. Their influence on the resonant oscillation frequencies of a cylindrical resonator is revealed. Recommendations for the geometry of the resonator and its elements have been developed;

- improved design of the base on which the newly designed resonator with holes on the wall of the cylinder is installed;

- the choice of electrodes used for oscillation excitation and measurement of the signals is experimentally substantiated;

- the technique and equipment for workplace electrodeless measurement of metallic resonator dynamic parameters after its manufacture have been developed;

- the influence of frequency mismatch, wave angle and positioning errors of the electrodes on the CVG bias and scale coefficient have been evaluated;

- a new accessory design has been developed to attach the electrodes to the new resonator design;

- the technique and equipment of the workplace for balancing the mass of the resonator on the fourth harmonic of the unbalance to reduce its frequency mismatch have been developed. The technique was tested in the manufactured sample of CVG;

- the technique of measuring the angles of non-orthogonality of the sensitive axis to its mounting surface has been developed and implemented in the experimental sample of CVG;
- the use of CVG to improve the accuracy of armament stabilization was analyzed;
- improved CVG standing wave control algorithm block diagram, which provides a fast start of the gyroscope when it is turned on at any temperature in the range of operating temperatures;
- the techniques for temperature correction of quadrature and angular rate phases, multiparameter correction of CVG bias and scale factor have been developed and tested on experimental sample of CVG, which leads to an increase in the accuracy of measuring angular rate under temperature gradients;
- the experimental results showed that the CVG with a metallic resonator is resistant to multiple shocks with amplitude 100 g and its bias is slightly dependent on the shock amplitude and does not exceed 5×10^{-3} deg/s. The bias sensitivity to vibration perturbations is 2.5×10^{-3} deg/s/g.

Key words: vibrating gyroscope, metallic resonator, angular rate measurement mode, bias, scale factor, correction, external perturbations.

